

気流のシミュレーションと粒子モデルを用いた火炎の擬似的表現

4C-5

田澤 英二郎 横矢 直和 竹村 治雄

奈良先端科学技術大学院大学

1. はじめに

近年、コンピュータ・グラフィックス(CG)においては、火炎、煙、雲、水などの、形が一意には決定できない対象物をいかに表現するかが重要な課題となっている[1, 2, 3]。

本稿ではCGにおいて火炎を擬似的に表現する手法を提案する。火炎を定義するために気体の自然対流のみから成る擬似的な火炎を仮定し、これを粒子モデルを用いて描画することにより、擬似的に火炎を表現する。粒子モデルを用いて火炎を表現するための既存手法[1, 3]では、気体の物理的振舞いはあまり考慮されていなかったが、ここでは気体の自然対流における気流に従い粒子を制御することにより気体の物理的振舞いを再現しながら火炎を表現する。

2. 火炎表現のための気流のシミュレーション

火炎を定義するための気体の自然対流のシミュレーションについて述べる。

気体の自然対流は、次に示す連続の式(1)、運動量保存式(2), (3)、各 x, y 方向、エネルギー保存式(4)、熱的状态方程式(5)によって表される。但し、 ρ : 密度、 u, v : x, y 方向の速度成分、 g_x, g_y : x, y 方向の加速度成分、 p : 圧力、 μ : 粘性係数、 e : 内部エネルギー、 κ : 熱伝導率、 T : 温度、 R : ガス定数とする。

これを例えば図1(a)に示す境界条件の下で、差分法による数値解析[4]を行うと、時間的にも空間的にも離散的な数値解が得られる。図1(b)は、ある時刻における空間的に離散的な気流の速度の数値解をベクトル表示したものである。数値解として、この他に気体の内部エネルギーも求められており、この様な関数値の時系列が得られるので、これらを保存してCGにおける火炎の定義情報とする。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

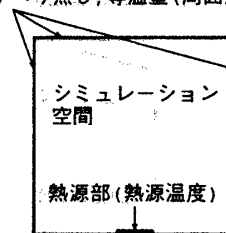
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} = \frac{\kappa}{\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left[2 \frac{\mu}{\rho} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} - \frac{2}{3} \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4)$$

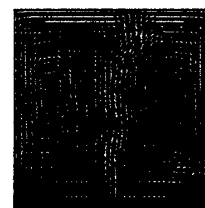
$$p \frac{1}{\rho} = RT \quad (5)$$

すべり無し、等温壁(周囲温度)



すべり無し、断熱壁(熱源部を除く)

(a) 境界条件



(b) 得られる気流の一例

図1: 気流シミュレーションの境界条件と得られる気流

3. 火炎画像の生成法

火炎画像の生成手順は概ね以下の通りである。

(1) 先に差分法で求めた各格子点上の時刻 t における関数値を画面座標系上に写像する。画面座標系上の任意の位置における関数値は写像された関数値の線形補間によって求める。

(2) 画面座標系上に予め設定した粒子発生領域の任意の位置に一定数の粒子を発生させる。ここで粒子とは気流のトレーサで、架空の物体である。

(3) 画面座標系上の粒子位置における気体の内部エネルギーの値に応じた色(後述)で、粒子を描画する。

(4) 画面座標系上の粒子位置における気体の流速に従い1単位時間に気体が移動するのに相当する距離と方向に、粒子を移動させる。

Quasi-representation of Flames Based on Fluid Flow Simulation and Particle Model

Eiji Tazawa, Naokazu Yokoya and Haruo Takemura

Nara Institute of Science and Technology

8916-5 Takayama, Ikoma, Nara 630-01, Japan

(5) 時刻を1単位時間進めて(1)に戻り、以後、同様な操作を繰り返す。その際、発生から n 単位時間を経過した粒子は消滅させる (n は寿命を表す定数)。

この様に、ある時刻における粒子を描画することによって火炎の形を形成し、これを時系列に表示して動画像とする。

4. 画像の表示色と描画方法

本手法では擬似的な火炎を仮定しているため、その表示色を独自に定義する必要がある。ここでは単に、暗い赤色から明るい赤橙色へと変化する色情報の定義を作り、これと気体の内部エネルギーの値とを対応付けて色表現を行った。

粒子群全体で火炎を表現するため、粒子数が画像の解像度に対して少ない場合、粒子のみを描画したのでは火炎の形として不適切なものとなることがある。そこで、画像を構成する全画素を対象として各画素の近傍(図2参照)に粒子が存在すればその画素を描画することにする。但し、本来粒子が存在しない画素も描画することになるため、近傍の粒子数に応じて描画時の輝度値を決定する。具体的には、気体の内部エネルギーの値1つに対し徐々に輝度値が低くなる様に設定した3種類の表示色を用意し、注目画素の近傍に粒子が3個以上存在する場合は最も輝度値の高い表示色で描画し、粒子が2個、1個の場合には、順に輝度値を低くした表示色で描画する。但し、注目画素に粒子が存在する場合には無条件に最も輝度値の高い表示色で描画する。

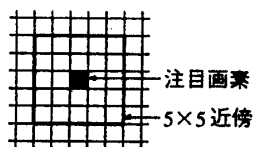


図 2: 注目画素とその近傍形: 5×5 近傍

実際には火炎は、ある時刻とその1単位時間後の時刻との間にも連続的に変化している。従って、ある瞬間時刻の火炎の静止画像を時系列に表示しても滑らかな動画像は得られない。この現象を緩和するために、1単位時間分の火炎の移動軌跡も含めて静止画像を描画する方法が提案されている[1, 3]。本手法でも簡単ではあるが、画素を描画する際に、その画素の位置における気体の流速に従い1単位時間に気体が移動するのに相当する距離と方向を、その画素を始点とした線分で描くことにする。

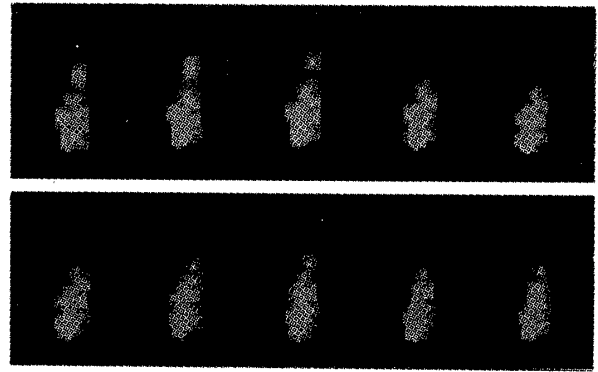


図 3: 火炎画像の生成例(左上から右下へ時系列)

5. 実験結果

以上のようにして生成した火炎画像の系列を図3に示す。数値解析は2次元に限り、 40×40 の格子空間、周囲温度と熱源の平均温度との温度差を $80[\text{K}]$ とし、気体の物性値として空気のものを用いた。熱源温度は時間的、空間的に $\pm 40[\text{K}]$ の変化をもたせている。画像は 80×80 画素、粒子数 30 個として描画した。

6. むすび

気体の物理的振舞いを含む現象である自然対流を考え、その一部分を粒子でトレースして得られる形を火炎の擬似的な形と仮定し、これを描画することによって擬似的に火炎を表現した。

気流の数値解析において、熱源温度に変化をもたせているため、非定常な気流を得ている。また、描画段階においては、時間軸方向の補間、及び、近傍の粒子数を考慮して各画素を描画することにより空間的な補間を、実現した。

問題点として、境界条件の設定方法や計算時間など、気流の数値解析における難点が挙げられる。また、火炎の表示色をどの様にして本物らしく表現するか、検討して行く必要がある。

参考文献

- [1] W.T.Reeves: "Particle Systems — A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects", Computer Graphics, Vol.17, No.3, pp.359-376(1983).
- [2] 安居院, 河野, 中嶋: "コンピュータグラフィックスにおける火炎の2次元画像の生成", 信学論 (D-II), Vol.J74-D-II, No.2, pp.184-189(1991).
- [3] 高橋, 村岡, 千葉: "粒子と渦場による炎・煙の2次元CGシミュレーション — 延焼と運動する燃焼領域を伴う場合 —", 情処研報, Vol.93, No.92, pp.1-8(1993).
- [4] 高橋: "コンピュータによる流体力学<演習>", pp.236-259, 構造計画研究所 (1982).